

スポーツと運動における心臓自律神経系活動の変化と適応

著者	菅原 順
著者別名	Sugawara Jun
内容記述	筑波大学博士（体育科学）学位論文・平成12年3月24日授与（甲第2437号）
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/2241/6548

第 3 章 本研究の課題，仮説，手法，用語の定義，限界

3.1 本研究の課題

本研究では，(1) 心臓自律神経系活動と持久性トレーニング及び持久性体力水準との関連，(2) 心臓自律神経系活動と生体リズムとの関連，(3) 心臓自律神経系活動とトレーニング状況との関連，の 3 つの研究課題を設定する。

課題 1 心臓自律神経系活動と持久性トレーニング及び持久性体力水準との関連

課題 1 では，安静時心臓自律神経系活動水準，及び運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答と持久性トレーニング及び持久性体力水準との関連を検討する。

先行研究では，安静時心臓自律神経系活動水準に持久性トレーニングが及ぼす影響を，縦断的に，しかも心臓副交感神経系及び交感神経系の両活動水準を同時に評価して検討した報告は少ない。行われた研究も有疾患者についての検討が主である。また，安静時心臓自律神経系活動水準に生じた変化が，トレーニング中止後，どの程度持続するのかについても，十分には明らかにされていない。本研究では，まず，持久性トレーニング及び脱トレーニングが安静時心臓副交感神経系及び心臓交感神経系活動水準に及ぼす影響を縦断的に検討するために，心拍変動パワースペクトル解析を用いて，2 つの実験（実験 1-1，2）を行った。

運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答については，持久性体力水準が高いアスリートでは一般健常者に比べて回復応答が速いことが先行研究で示唆されているが，本研究では，持久性体力水準と心臓副交感神経系活動回復応答との関連をさらに明確にするために，幅の広い持久性体力水準を持つ集団を対象に横断的な実験（実験 1-3）を行った。また，先行研究では，持久性トレーニングが心臓副交感神経系活動回復応答に及ぼす影響の縦断的検討は行われていない。さらに，中高齢者を対象にした検討も行われていない。そこで，本研究では，運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答に持久性トレーニングが及ぼす影響を，若齢者及び中高齢者を対象にして縦断的に検討するために，運動終了後 30 秒間の心拍数回復過程の時定数 (T_{30}) を指標にして，以下の 2 つの実験（実験 1-4，5）を行った。実験 1-5 では，若齢者と中高齢者の横断的比較も行った。

実験 1-1：フルマラソンへの参加を目的とした 7 ヶ月間の持久性トレーニングプログラム

に参加した健常な若齢男性を対象に、トレーニングプログラム前後での安静時心臓副交感神経系及び交感神経系活動水準の変化を、心拍変動パワースペクトル解析を用いて縦断的に検討する。

実験 1-2：運動習慣を持たない健常な若齢男性を対象に、8 週間の持久性トレーニング及びその後の 4 週間の脱トレーニングが安静時心臓自律神経系活動水準に及ぼす影響を検討する。

実験 1-3：持久性体力水準の異なる健常な若齢男性を対象に、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答と最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) との関連性を横断的に検討する。

実験 1-4：運動習慣を持たない健常な若齢男性を対象に、8 週間の持久性トレーニングが運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答に及ぼす影響を、 $\dot{V}O_{2max}$ の変化と関連させながら検討する。さらに、トレーニング後の 4 週間の脱トレーニングが及ぼす影響についても検討する。

実験 1-5：若齢及び中高齢女性を対象に、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答に及ぼす加齢の影響を検討し、次に、健康づくり運動プログラムに参加した中高齢女性を対象に、比較的低強度の運動トレーニングが心臓副交感神経系活動回復応答に及ぼす影響を検討する。

課題 2 心臓自律神経系活動と生体リズムとの関連

先行研究により、心臓自律神経系活動にはサーカディアンリズムが存在することが明らかにされているが、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答に関する時間生物学的検討はなされていない。また、心臓自律神経系活動と朝型や夜型のクロノタイプの関連に関しても検討されていない。そこで課題 2 では、クロノタイプの違いが運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答の日内変動パターンに及ぼす影響について検討を行うことを課題とし、以下の実験を行った。

実験 2：健常な若齢男性を質問紙によってクロノタイプ別に分類し、朝と夕方における運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答を比較検討する。

課題 3 心臓自律神経系活動とトレーニング状況との関連

先行研究により、急性疲労や慢性疲労時に心臓自律神経系活動水準に変化が生じる可能性が示唆されているが、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答への影響については検討されていない。運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答を反映する T_{30} は、運動負荷の強度が換気性閾値 (ventilatory threshold: VT) 以下であれば負荷強度の影響をほとんど受けないことが示されているので、厳密な運動負荷強度の設定が困難なフィールドに適用すれば、コンディショニングのための指標の一つとして応用できることが期待される。そこで、課題 3 では、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答をオーバートレーニング症候群の予防などを目的とするコンディショニングのための指標として応用することを目標にして、まず、フィールドでの頻回な測定が可能な心臓副交感神経系活動回復応答の簡易評価の指標を開発するための実験 (実験 3-1) を行い、簡易指標の妥当性を明らかにした上で、その指標にトレーニング状況が及ぼす影響について、従来から用いられている生理的体調の指標と比較検討する実験 (実験 3-2) を行った。

実験 3-1 : T_{30} に代わる運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答の簡易評価の指標として、運動終了後 30 秒間の心拍減少率を提案し、健常な若齢男性を対象にして、 T_{30} との関連、持久性体力水準との関連、及び運動強度依存性を検討する。

実験 3-2 : 大学男子陸上中長距離走選手を対象に、夏期強化合宿中におけるフィールドでのランニングテストによる運動終了後 30 秒間の心拍減少率の変動を観察し、トレーニング状況及びトレーニングに伴う生理学的及び心理学的指標の変動との関連を検討する。

3.2 本研究の仮説

本研究で設定した実験の仮説を以下に示す。

実験 1-1, 2 : 持久性トレーニングを継続すると安静時心臓副交感神経系活動水準が増大し、安静時心臓交感神経系活動水準は低下する。脱トレーニングによりトレーニングで得られた安静時心臓自律神経系活動水準への効果は消失する。

実験 1-3, 4 : 運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答は持久性体力水準と関連し、持久性トレーニングを継続すると心臓副交感神経系活動回復応答が促進する。脱トレーニング

グによりトレーニングで得られた心臓副交感神経系活動回復応答への効果は消失する。

実験 1-5：中高齢者では若齢者に比べて運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答が遅延しているが、持久性トレーニングによって心臓副交感神経系活動回復応答を改善できる。

実験 2：クロノタイプにより、運動終了後における心臓副交感神経系活動回復応答の日内変動パターンが異なる。

実験 3-1, 2：簡易指標として提案する運動終了後 30 秒間の心拍減少率を用いても、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答の評価が可能である。また、フィールドで測定した簡易指標はトレーニング状況に伴う生体の疲労などを反映する。

3.3 本研究で用いた心臓自律神経系活動の評価方法

3.3.1. 安静時心臓自律神経系活動水準の評価

本研究では、心臓副交感神経系及び心臓交感神経系の活動水準を、分離して定量的かつ非侵襲的に評価できる心拍変動パワースペクトル解析 (Akselrod et al. 1981 ; Pagani et al. 1986 ; Pomeranz et al. 1985) を用いて、安静時心臓自律神経系活動水準を測定した。

心拍変動とは心周期のゆらぎのことを指し、心電図の R-R 間隔変動として測定される。心拍変動には様々なメカニズムに起因するゆらぎが混在する。一般的に、不規則な変動は様々なゆらぎ (波) の合成であると考えられ、スペクトル解析を用いると、ゆらぎをそれぞれの周波数に対応する波の振幅あるいはエネルギー (パワー密度：振幅の 2 乗) に分解して表すことができる。心拍変動パワースペクトル解析では、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) や最大エントロピー法 (Maximum Entropy Method: MEM) などを用いて、R-R 間隔変動に含まれる生体の様々なメカニズムに由来するゆらぎがパワースペクトル成分に分解して表現される。先行研究 (Akselrod et al. 1981 ; Pomeranz et al. 1985 ; Pagani et al. 1986) において、自律神経遮断薬の投与や姿勢変化を加えた際に生じた R-R 間隔変動のパワースペクトル成分の変化から、高周波成分は心臓副交感神経系活動水準を、低周波成分は心臓副交感神経系活動水準及び交感神経系活動水準を反映することが明らかにされている。本研究では、算出した心拍変動パワースペクトラム分布から、0.04-0.15 Hz 及び 0.15-0.50 Hz の周波数帯域に含まれるスペクトル成分の積分値をそれぞれ低周波成分 (Low Frequency: LF) 及び高周波成分 (High Frequency: HF) とし、HF を心臓副交感

神経系活動水準の指標、LF と HF の比 (LF/HF) を心臓交感神経系活動水準の指標とした。

本研究における心拍変動パワースペクトル解析は、FFT あるいは MEM を用いて行った。FFT による解析では、心電図自動解析システム (ESAOTE S. P. A. ; ESAOTE BIOMEDICA FOMURA) を使用し、胸部誘導法にて仰臥位安静時の心電図 R-R 間隔の時系列データを記録した。得られた記録から安定した連続 256 心拍の R-R 間隔時系列データを選び、付属の解析プログラムにより心拍変動パワースペクトル解析を行った。MEM による解析では、メモリー心拍計 (GMS ; LRR-03) を用い、胸部誘導法にて仰臥位安静時の心電図 R-R 間隔時系列データを記録した。R-R 間隔時系列データをパーソナルコンピュータ (NEC ; PC9801) に取り込んだ後、MEM と時間領域における解析を行うための非線形最小自乗法を結合した汎用時系列データ解析システム (諏訪トラスト ; MemCalc システム) を使用し、連続 R-R 間隔時系列データの心拍変動パワースペクトラム分布を求めた。

上記の測定では、全ての実験において被験者の呼吸数を一定に制御した。これは、前述したように、心拍変動の呼吸性成分が呼吸数の影響を受けること (Hirsch and Bishop 1981 ; Hayano et al. 1994) が報告されているためである。呼吸数の制御として、1 分間に 15 回のリズムに調整した信号音をオーディオテープに録音し、被験者にはそのテープのリズムに合わせて呼吸するように指示した。1 分間 15 サイクルに設定した理由は、自然の呼吸数に近く、しかも心臓副交感神経系活動水準を反映する高周波成分を心臓交感神経系による心拍調節の周波数伝達特性の上限である 0.15 Hz より高くし、パワースペクトル成分の分離を明確にするためである。なお、心電図の記録に先立って、全ての被験者に呼吸数制御の練習を十分に行わせた。

測定の時間帯は日内変動の影響を出来る限り排除するため、心臓自律神経系活動が比較的安定するとされる午後の時間帯 (午後 2~7 時) とし、それぞれの被験者において複数回測定を行う場合にはできる限り同じ時間帯で測定を行うようにした。実験室の室温を 24~25℃ に制御した。心臓自律神経系活動に影響を及ぼすと思われる因子を取り除くため、測定前日のアルコール摂取、測定当日の運動、薬剤の服用及びカフェインの摂取、測定 3 時間前の睡眠及び食物飲料の摂取を禁止した。

心拍変動パワースペクトル解析で得られた指標の統計処理では、指標の個人差が大きく正規分布しないので、対数変換処理を行った後に統計学的検定を行った。

3.3.2. 運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答の評価

本研究では、心臓自律神経系活動の負荷に対する反応性の評価として、運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答を検討した。上述の心拍変動パワースペクトル解析では、時系列データが解析対象となる時間内で定常性を持つことが原則となる。解析には、FFT では 256 心拍、最少でも 128 心拍を含む時間長が必要であり、時間分解能に優れる MEM でもすくなくとも 20 秒程度の時間長が必要である。したがって、運動終了後早期のように心拍数が急激に変化している状態では心拍変動パワースペクトル解析を適用することは適切でない。そこで、運動終了後早期における心臓副交感神経系活動回復応答の評価法として提案されたのが、運動終了後 30 秒間における瞬時心拍数回復過程を指数関数で近似させた際の時定数 (T_{30}) である (Imai et al. 1994)。VT 以下の運動の場合、 T_{30} は副交感神経遮断剤を投与すると延長するが、交感神経遮断剤を投与しても変化しないので、この指数は運動終了後における心臓副交感神経系活動回復応答を特異的に反映していると考えられる。 T_{30} は、運動負荷が VT 以下の強度であれば運動負荷量及び運動終了時の血圧、酸素摂取量の影響を受けないが、運動負荷が VT を越える高強度のものになると、おそらくは末梢からの反射や血中のカテコラミン濃度の上昇が影響して、 T_{30} は延長する (Imai et al. 1994)。したがって、心臓副交感神経系活動回復応答を適切に評価するためには、VT 以下の比較的低強度の運動負荷を用いる必要がある。

本研究での T_{30} の測定には、自転車エルゴメーターを使用し、被験者に VT 以下の強度の運動を 4 分間負荷した。瞬時心拍数計 (NADEX ; AM01-M01)、もしくはメモリー心拍計 (GMS ; LRR-03) を使用し、胸部誘導法にて運動開始前、運動中、及び回復期における瞬時心拍数ないし心電図 R-R 間隔の時系列データを記録した後、パーソナルコンピュータ (NEC ; PC9801) に取り込んだ。運動終了後において、心拍数は指数関数的に減少し、その過程は以下の等式で近似される (Perini et al. 1989)。

$$\text{Heart rate (t)} = a_0 + b \times \exp(-t / \tau)$$

a_0 : $t = \infty$ とした時の心拍数の収束値, b : 運動終了時の心拍数と収束値の差, τ : 時定数
本研究では、Imai ら (Imai et al. 1994) に従い、運動終了後 30 秒間の瞬時心拍数を対数変換した後に時間に関して直線回帰し、回帰直線の傾きの逆数を求めた (Fig. 3-1)。

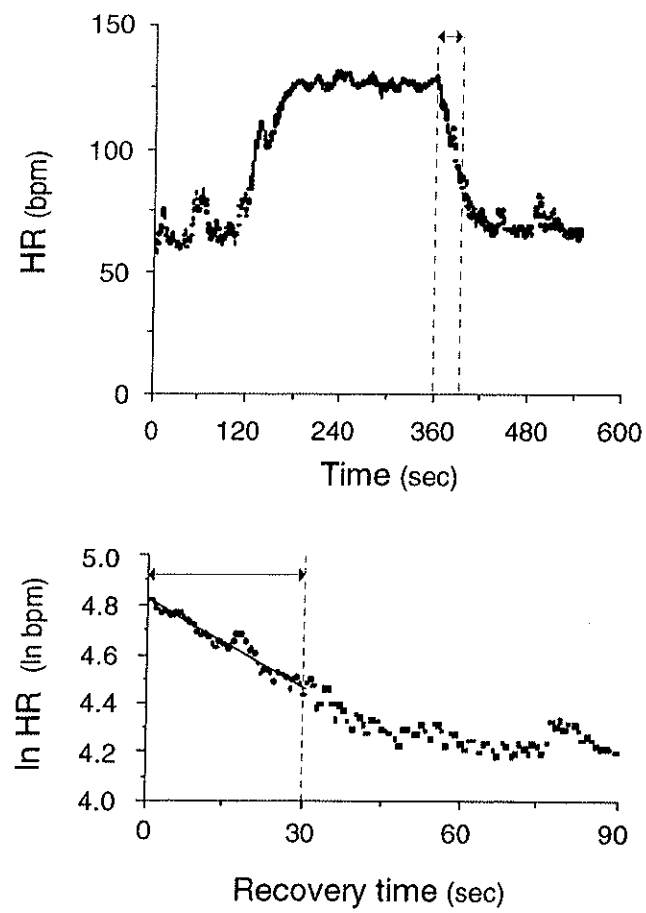


Fig. 3-1 Analysis of post-exercise heart rate decrease.

測定時間帯による日内変動の影響を排除する目的で、それぞれの被験者において複数回測定を行う場合にはできる限り同じ時間帯で測定を行うようにした。また、測定環境や被験者への留意事項も安静時心臓自律神経系活動水準の測定に準じた。

3.4 本研究で使用する用語の定義

A. トレーニング

本研究では、身体を構成する器官や組織の形態と機能を目的とする方向に改善するための身体運動の手段と定義する。トレーニングの目的、動機としては、健康スポーツを対象にした場合には、健康・体力を維持増進させる、あるいは病気や傷害からの回復を図るといったことが考えられ、また競技スポーツでは競技能力の向上などが考えられる。本研究で「トレーニング状況」とした場合のトレーニングは、とくにアスリートの競技能力の向上を目指して行われるものに限定する。一方、「持久性トレーニング」は、全身持久力の向上を目的としたトレーニング方法ということであり、対象者の限定はとくに行わない。

B. コンディショニング

一般的には、スポーツ活動を行う上でより効果的な身体的活動が行えるように体力や体調を適度な状態に整えることと定義される。コンディショニングの目的は、対象によって多様であり、試合での優れたパフォーマンスの発揮、効果的なトレーニングの実施、スポーツ活動時あるいはリハビリテーションの際の安全確保などが考えられる。内容も多様であるが、本研究では、持久性トレーニングによる全身持久力の向上、生体リズムとの関連、トレーニング状況と関連した生体の疲労とその回復の調整などに限定した。

C. 体調

本研究では、スポーツ活動に関連した生体の生理的及び心理的状态と定義する。

D. 持久性体力水準

本研究では、持久性体力水準は $\dot{V}O_2\text{max}$ をもって評価する。

E. 換気性閾値

本研究では、漸増負荷運動中に認められる換気量、二酸化炭素排出量、呼気終末ガス分圧などの換気変量に非直線的変化（閾値状の変化）が生じる運動負荷強度と定義する。

F. オーバートレーニング症候群

本研究では、過剰なトレーニングによってパフォーマンスが低下し、容易に回復しなくなった慢性疲労状態と定義する。単に「オーバートレーニング」という場合は、トレーニングが過剰ということを意味し、オーバートレーニング症候群とは意味合いが異なる。

3.5 本研究の限界

A. 対象

本研究の被験者の多くは健常若年男性であり、女性及び中高齢者を対象とした検討は実験 1-5 のみである。このように、被験者の年齢及び性別に偏りがあることは本研究の限界である。

B. 測定法

心拍変動パワースペクトル解析：本研究では、安静時心臓自律神経系活動水準の評価に心拍変動パワースペクトル解析を用いた。心拍変動パワースペクトル解析によって得られる心臓自律神経系の各指標は、心臓を支配する自律神経系の活動水準と受容体の機能を総体として表したものであり、心臓自律神経系活動水準のみを分離して評価した指標ではない。また、本研究では心臓交感神経系活動水準として LF/HF を指標とした。LF は、自律神経遮断薬を用いた研究で心臓交感神経系活動と心臓副交感神経系活動の両者が関与するゆらぎの成分であるとされていることから、多くの研究では心臓副交感神経系活動の影響を除外するために LF と HF の比が用いられるが、心臓副交感神経系活動に由来するゆらぎの大きさが低周波帯域と高周波帯域で同一であるという保証はない。これらのことは、心拍変動パワースペクトル解析を用いた心臓自律神経系活動水準の評価に関する方法上の限界である。

T_{30} ：本研究では、VT 以下の運動終了後 30 秒間の瞬時心拍数回復過程を指数曲線で近似し、その曲線の時定数 (T_{30}) により運動終了後の心臓副交感神経系活動回復応答を評価した。 T_{30} は、運動後の心臓副交感神経系活動回復応答を特異的に反映する指標であるが、逆にいえば、運動負荷に対する心臓交感神経系活動の応答を評価することはできない。とくに、運動が高強度になれば心臓交感神経活動の影響の持つ意義が大きくなると思われるので、このことは本研究の限界である。

C. 用語の定義

本研究には用語の定義に由来する限界がある。持久性体力水準は $\dot{V}O_2\max$ に限定して研

究を進めた。また、コンディショニングの内容、あるいは体力や体調の指標を全て網羅することは不可能なので、課題毎に限定して研究を進めた。

D. 持久性トレーニング

本研究において検討された心臓自律神経系活動と持久性トレーニングとの関連は、本研究で施行したトレーニングの強度や量、及び期間によって規定されたものであり、得られた成果は、直ちに一般化されるわけではない。